

PROBLEMAS HISTÓRICOS Y DIFICULTADES DE LOS ESTUDIANTES EN LA CONCEPTUALIZACIÓN DE SUSTANCIA Y COMPUESTO QUÍMICO

FURIÓ-MAS, CARLES y DOMÍNGUEZ-SALES, CONSUELO

Departament de Didàctica de les Ciències Experimentals i Socials. Universitat de València

carles.furio@uv.es

xelodominguez@hotmail.com

Resumen. Este trabajo ofrece un análisis histórico sobre los problemas que tuvo que resolver la ciencia hasta llegar a la construcción de los conceptos macroscópicos de *sustancia* y *compuesto químico* en el contexto de la teoría daltoniana. Por otra parte, en él se muestran algunas de las dificultades de comprensión que estos conceptos ofrecen a los estudiantes. Para determinarlas, se realiza un estudio transversal con alumnos de 15 a 18 años, lo que permite evaluar el significado que otorgan a la idea de sustancia, al tiempo que se constata la necesidad de su comprensión para poder entender los cambios químicos. Por último, se plantea la existencia de ciertas semejanzas entre las ideas sobre la composición de la materia que ofrecen modelos históricos anteriores a la teoría daltoniana y la visión actual de los estudiantes.

Palabras clave. Problemas históricos, dificultades de aprendizaje, sustancia, compuesto químico.

Historical problems and students' difficulties to the conceptualization of chemical substance and compound

Summary. In this work we offer a historical analysis about the problems that science had to solve in order to elaborate the macroscopic concepts of substance and chemical compound in the daltonian theory context. On it we show, too, some of the students' difficulties to comprehend these concepts. To settle them, we have carried out a transversal study among 15 to 18 year old students in order to evaluate the meaning they give to the idea of substance. Our claim is that its comprehension is necessary to be able to understand chemical changes. Finally, in relation to the ideas about matter consideration, we propose the existence of certain similarities among some historical models previous to the daltonian theory and the students' present vision.

Keywords. Historical problems, learning difficulties, substance, chemical compound.

INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La investigación sobre concepciones alternativas está centrando su atención en el análisis de cómo aprende y progresa el estudiante para elaborar hipótesis de progresión en cada dominio específico (Millar, 1996; Rahayu y Tytler, 1999). Este conocimiento empírico del proceso de aprendizaje puede servir para fundamentar psicológicamente la secuenciación de los contenidos a enseñar (Cañal, 1997). En opinión de algunos investigadores esta secuenciación también puede basarse en una

fundamentación epistemológica de la ciencia a enseñar (Mortimer, 1995). Según esta última opinión, el análisis histórico y epistemológico puede ser una herramienta de gran ayuda, ya que se ha detectado cierto isomorfismo entre determinados conceptos resistentes al proceso de enseñanza-aprendizaje y algunos de los problemas que se presentaron a lo largo de su construcción en la historia de la ciencia (Furió, Hernández y Harris, 1987; Wandersee, Mintzes y Novak, 1994).

Es importante cuestionar una concepción tácitamente aceptada por algunos investigadores que consiste en asociar directamente la percepción de los estudiantes sobre los cambios químicos con un único modelo macroscópico de representación cuando, por ejemplo, se afirma que los estudiantes conciben la materia y sus cambios tal como los perciben (Pozo y Gómez Crespo, 2005). En nuestra opinión, un mismo fenómeno percibido por un estudiante puede ser interpretado por él mismo de varias maneras que pueden corresponder a varios perfiles conceptuales (Mortimer, 2001) en forma de representaciones macroscópicas y/o microscópicas, correctas o incorrectas desde el punto de vista científico actual. Es aquí donde resulta de interés para el profesor conocer los modelos históricos que se han desarrollado en la ciencia con el fin de relativizar la infravaloración que se suele dar en la investigación a las representaciones macroscópicas de los escolares en un dominio concreto de las ciencias. Un ejemplo del elevado valor que, acertadamente, damos los profesores a una visión macroscópica de los fenómenos químicos es que cuando se inicia la enseñanza de la química e introducimos la conservación de la masa, en por ejemplo la oxidación del estaño en sistema cerrado, la razonamos basándonos en un modelo histórico de representación macroscópica de las sustancias implicadas en este cambio químico tal como hizo Lavoisier. Posteriormente estos cambios químicos fueron interpretados microscópicamente con el modelo atómico daltoniano.

En este trabajo presentaremos los conceptos macroscópicos de *sustancia y compuesto químico* cuya construcción se inició, en nuestra opinión, en el modelo desarrollado por los filósofos mecánicos y químicos de los siglos XVII a XIX sobre los cambios químicos. A continuación, trataremos de ver si se presenta algún tipo de isomorfismo entre los obstáculos epistemológicos que dificultaron esta construcción histórica y las dificultades de aprendizaje de aquellos conceptos. Se parte del supuesto de que, muy posiblemente, aquellos obstáculos epistemológicos puedan decirnos algo sobre las dificultades de comprensión de nuestros estudiantes, dado que las ideas científicas aceptadas actualmente en ocasiones fueron rechazadas por razones similares a las que ellos proponen (Saltiel y Viennot, 1985; Driver y Oldham, 1985). Con el fin de precisar el problema didáctico, centraremos nuestro estudio en el contexto de aprendizaje de la teoría atómica clásica de la materia que suele enseñarse en los niveles de bachillerato, es decir, a estudiantes de química de entre 16 y 18 años. A partir de estas bases, la cuestión principal que se plantea este estudio es la siguiente:

¿El estudio histórico del desarrollo de los conceptos de *sustancia y compuesto químico* puede ayudarnos a comprender las dificultades que pueden presentarse en los estudiantes al tratar de conceptualizar aquellas ideas en la enseñanza de la química?

Para responder a esta pregunta, la dividiremos en tres cuestiones más particulares:

- ¿Cómo se construyeron históricamente las conceptualizaciones macroscópica y microscópica de sustancia química y de compuesto en los modelos históricos empirista y daltoniano desarrollados a lo largo de los siglos XVIII y XIX, respectivamente?

• ¿Cuáles son las principales ideas y dificultades de los estudiantes de bachillerato que han realizado estudios de química respecto a los conceptos de *sustancia y compuesto*?

- ¿En qué medida las dificultades que se opusieron a los avances históricos se asemejan a los principales problemas de comprensión del alumnado respecto de estos conceptos?

ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LOS CONCEPTOS MACROSCÓPICO Y MICROSCÓPICO DE SUSTANCIA Y COMPUESTO

A lo largo de la historia, han sido varios los modelos conceptuales que se han planteado la interpretación de la diversidad de los materiales existentes en la Tierra, así como sus cambios químicos. Una de las primeras cosmovisiones fue la del modelo aristotélico-escolástico, introducido por los filósofos griegos hace más de veinticinco siglos y prácticamente hegemónico hasta el siglo XVI. Según esta concepción, el mundo terrestre era impuro, dado que estaba formado por mezclas de cuatro elementos, mientras que el mundo celeste se suponía puro, es decir formado por un único elemento: el éter (Gil, 1981). Estas ideas comenzaron a ponerse en cuestión a partir del siglo XVI y es en el XVII cuando filósofos mecánicos, como Boyle, empezaron a introducir de manera implícita que los sistemas materiales terrestres podían estar formados macroscópicamente, bien por mezclas (de sustancias) o bien por una única sustancia que, a su vez, podía ser «*un cuerpo perfectamente sin mezcla*» (sustancia simple) o «*un cuerpo perfectamente mezclado*» (sustancia compuesta) (Holton y Roller, 1963). Llegar a concebir una explicación atomista de los cambios químicos en el siglo XIX requirió superar previamente controversias sobre los conceptos macroscópicos de *sustancia y compuesto químico*. Con el fin de presentar los principales problemas históricos que se produjeron hasta llegar a la introducción de estos conceptos en lo que podemos llamar modelo macroscópico del siglo XVIII y cómo fueron interpretados microscópicamente en el modelo atomista del XIX, se resumen a continuación los principales saltos cualitativos que llevaron a la concepción de la química como una ciencia moderna.

a) La superación de las diferencias propuestas en el modelo aristotélico entre la materia corpórea (sólidos y líquidos) y la materia rara (gases) facilitó la hipótesis del comportamiento unitario de la materia

Según el paradigma aristotélico, todos los objetos materiales terrestres estaban formados por una única *materia prima* sobre la cual se habían impreso unas cualidades aportadas por los conocidos cuatro elementos. La proporción de cada

uno de ellos en el material explicaba cualitativamente las propiedades del mismo. A título de ejemplo, según este modelo, el agua cotidiana estaba formada por los elementos agua (mayoritario en su composición), aire (cuyo desprendimiento se observa inicialmente al calentar el agua) y tierra (que es el residuo que queda en el recipiente cuando toda el agua se ha vaporizado). La diversidad de materiales existentes se clasificaba atendiendo a la posibilidad de ser percibidos, o no, por los sentidos. Así, aquellos que se veían, se podían tocar y pesar fueron considerados *materia corpórea* (cuerpos), mientras aquellos otros como los gases y vapores que apenas se veían y no podían pesarse (porque flotaban) se les clasificaba como *materia rara*. Los cambios físicos y químicos se explicaban, sin diferenciación, basándose en la transmutación de unos elementos en otros cuando ocurrían estos procesos. Así por ejemplo, el paso de líquido a vapor, entonces denominado *rarefacción*, era considerado una transmutación del elemento agua, mayoritario en la composición de la materia corpórea *agua*, en el elemento aire de la materia rara *aire*, por la acción del elemento fuego. Por ello, el líquido inicial y el gas final resultante eran considerados materiales diferentes, dado que tenían propiedades físicas distintas.

En este modelo histórico no hace falta introducir el concepto de *sustancia* puesto que todos los sistemas materiales terrestres eran considerados mezclas de elementos ideales. Los fenómenos químicos más conocidos se clasificaban en tres tipos: la *síntesis* o proceso en el que se obtenía una mezcla heterogénea, la *crasis* o unión en la que se obtiene una mezcla homogénea y la *mixis*, en la que varios cuerpos se fundían para formar uno diferente (Leicester, 1967). En realidad, el concepto de *mixis*

se refería, más en particular, a lo que hoy consideramos aleaciones. Se suponía que, al dividir de forma indefinida la «mezcla homogénea» obtenida, debería llegar un momento en que las partes yuxtapuestas se separarían. Dado que esta separación jamás se daba en la práctica, su explicación planteaba un problema que no resolvió este modelo histórico macroscópico (Partington, 1948).

Hasta que no se consideró que los gases tenían el mismo carácter corpóreo que los sólidos y líquidos, existió una barrera que entorpeció las posteriores innovaciones (Brock, 1998). La superación de parte de los problemas enunciados hasta el momento comenzó a lo largo de los siglos XVI y XVII, cuando se llegó a mostrar que los gases, como el aire atmosférico, tenían peso (hipótesis de la existencia del «mar de aire» postulada por físicos como Torricelli, Pascal, von Guericke, etc.), que eran elásticos como los metales (trabajos de Boyle) y que no solamente existía el aire atmosférico, sino otros gases diferentes como el actual CO₂ (trabajos de van Helmont). Esta acumulación empírica de conocimientos llevó a aceptar la materialidad de los gases, la generalización de los tres estados físicos y a presuponer el comportamiento unitario de la materia. Ello supuso un paso importante en la superación de la polémica entre materia continua o discontinua, al aceptarse más tarde como hipótesis general la estructura corpuscular de la misma (Hernández, 1997).

En el cuadro 1 se resumen algunas de las explicaciones que la filosofía aristotélico-escolástica daba a los hechos empíricos relativos a la composición de los materiales y sus transformaciones, así como las principales dificultades y problemas que tuvieron.

Cuadro 1

Breve resumen de las principales explicaciones dadas por el modelo aristotélico-escolástico a la composición de los materiales y sus cambios así como algunos de sus problemas y dificultades.

REFERENTES EMPÍRICOS	DESCRIPCIÓN Y EXPLICACIÓN	DIFICULTADES Y PROBLEMAS
<ul style="list-style-type: none"> • Los materiales ordinarios presentan una gran diversidad en sus propiedades. • Se establece una diferencia categórica entre materia corpórea (sólidos y líquidos) y materia rara (vapores, gases, etc.). • La materia corpórea se clasifica en heterogénea y homogénea, según se observen directamente sus distintos componentes o no. • Los cambios materiales son muy diversos y forman un continuo, desde los más lábiles, como la rarefacción (vaporización), disolución, etc., hasta los más violentos (químicos), como la neutralización, la calcinación o la combustión. Así pues, entre los cambios físicos y los químicos no hay diferencias categóricas, sólo de grado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los materiales reales están constituidos por una <i>materia prima</i> común sobre la que se imprime una <i>forma</i>, resultado de la mezcla de cuatro elementos ideales (tierra, agua, aire y fuego) y tres principios (mercurio, azufre y sal). Esta <i>forma</i> determina las propiedades observables, que se explican cualitativamente según la composición elemental de la mezcla. • Las propiedades de la materia corpórea se explican por contener mayoritariamente los elementos tierra y agua, mientras que los más abundantes en la materia rara son el aire y el fuego. • La mayor o menor homogeneidad de una mezcla se explica a partir del animismo y finalismo atribuidos a todos los seres, animados e inanimados. En particular, las relaciones de amor/odio de los materiales mezclados determinarán la homogeneidad o heterogeneidad de la mezcla. Por ejemplo, «lo semejante disuelve a lo semejante», es una regla empírica usada también actualmente, que tiene su fundamento en estas explicaciones. • Cualquier transformación se explica mediante la transmutación, producida a causa de una variación en la proporción de los elementos (cualidades). 	<ul style="list-style-type: none"> • No existe el concepto de <i>sustancia</i> opuesto al de <i>mezcla</i>, puesto que todos los materiales son considerados mezclas de elementos ideales que les dan forma (el mundo terrestre es impuro a diferencia del celeste). • Se establece una barrera entre la materia corpórea y la materia rara, esto es, los gases poseen un estatus material diferente al de los sólidos y líquidos. Ello dificulta considerar la unidad de comportamiento de toda la materia ordinaria. • Los <i>mixtos</i> (en especial, aquellos que hoy consideramos sustancias compuestas) no presentan las propiedades de los materiales iniciales que los han formado. Para explicarlo se ha de suponer que los elementos existen en el mixto <i>en potencia</i> y no <i>en acto</i>. • Se suceden los fracasos en los procesos de transmutación que persiguen convertir los metales no nobles (plomo, zinc...) en oro. • Los paracelsianos ponen en cuestión la existencia de un único aire. Van Helmont propugna la existencia de gases distintos al aire común como, por ejemplo, «el gas silvestre», actual CO₂.

b) A lo largo de los siglos XVI al XVIII se fueron construyendo los conceptos macroscópicos de sustancia química y compuesto en el modelo de los filósofos y químicos mecanicistas

Los avances en metalurgia y el uso en medicina de sustancias químicas como remedios para curar enfermedades propiciaron el desarrollo de las técnicas analíticas. Al mismo tiempo, los estudios empíricos de los filósofos mecánicos del siglo XVII, sobre análisis y síntesis de los cuerpos, llevaron a cuestionar la idea de elemento aristotélico (Boas, 1969). Todo ello hizo necesaria la introducción de la *definición operacional de sustancia* (Chalmers, 1998), opuesta a la idea de mezcla y definida como *cuerpo con un conjunto de propiedades físicas y químicas características* (Solsona e Izquierdo, 1998). El aumento de sustancias conocidas hizo necesaria una sistematización, de forma que los compuestos conocidos fueron recogidos en tablas, en las que se relacionaban de acuerdo con su afinidad química, es decir, según su reactividad (Estanny e Izquierdo, 1990). Una de las primeras de estas tablas fue elaborada por Geoffroy en 1718. En ella, las sustancias estaban organizadas en columnas, de forma que cada compuesto podía ser fácilmente atacado por los que se encontraban situados por encima de él, quedando así explícitas sus posibilidades de combinación.

Los científicos del siglo XVIII consideraban los cambios químicos como una transmutación o como una separación de las cualidades, al tiempo que se producía una nueva generación de sustancias a partir del cuerpo inicial.

Geoffroy, en cambio, asumió que las sustancias químicas eran entidades relativamente estables y describió la formación de compuestos y el análisis químico en términos de «desplazamiento» de sustancias basado en un «buen entendimiento». La novedad de su idea radicaba en un cambio en la forma de ver las transformaciones, ya que explicaba los cambios como movimientos mecánicos (desplazamientos) de sustancias. Es decir, en el proceso de formación de un compuesto a partir de dos sustancias se habían de poner en contacto y, si eran afines, se unían. Para explicar la descomposición del compuesto a causa de la adición de una tercera sustancia, se suponía que una de las dos sustancias originales que lo habían formado era apartada de su lugar, pasando a ser sustituida por la finalmente agregada (reacción de desplazamiento). Esta comprensión de los cambios químicos como interacción sustancial presente en los escritos de Geoffroy era propia del modelo histórico macroscópico de esta época y no requiere una teoría atómica de la materia. No obstante, algún autor indica que lo anterior presupone una aceptación tácita de la estructura corpuscular de la materia (Boas, 1969). En lo que sí existe cierto consenso es en señalar que Geoffroy diferenció empíricamente entre mezcla y compuesto químico contribuyendo así a la definición operacional de compuesto químico como cuerpo que tiene un conjunto de propiedades químicas características susceptibles de contrastación empírica (Klein, 1996).

Ahora bien, esta definición operacional macroscópica de sustancia costó de aceptar hasta bien entrado el siglo XIX, tras superarse importantes controversias, como la cono-

Cuadro 2

Explicaciones del modelo empírico de los filósofos mecánicos y químicos (siglos XVI al XVIII) sobre la composición de la materia terrestre a partir de las definiciones operacionales de sustancia y compuesto químico y problemas que subsisten.

REFERENTES EMPÍRICOS	DESCRIPCIÓN Y EXPLICACIÓN	DIFICULTADES Y PROBLEMAS
<ul style="list-style-type: none"> • Cualquier sistema material real (cuerpo) puede catalogarse como: <ul style="list-style-type: none"> – Mezcla (de sustancias) – <i>Cuerpo perfectamente mezclado</i> (hoy sustancia compuesta) – <i>Cuerpo perfectamente sin mezcla</i> (sustancia simple en la actualidad) • Se acepta la existencia de diferentes «aires» con propiedades distintas (van Helmont). • Se acepta la <i>corporeidad</i> de la materia rara aristotélica. Es decir, se asume que los gases son tan materiales como la materia condensada (sólidos y líquidos), por tanto, tienen masa y peso. • Se presume que una misma sustancia puede estar en los tres estados de la materia (sólido, líquido y gas) y el paso de uno a otro es reversible. • Además de los cambios físicos, se acepta que, en los cambios químicos, las sustancias reaccionantes se pueden transformar en otras distintas, aunque no en cualesquiera. • Las sustancias se clasifican en metales y no metales según sus propiedades ópticas (color y brillo) y mecánicas (elasticidad, maleabilidad...). 	<ul style="list-style-type: none"> • Se define empíricamente la sustancia como <i>cuerpo que tiene un conjunto de propiedades características que sirven para su reconocimiento</i>. • El comportamiento unitario de los gases lleva a aceptar su naturaleza corpuscular, hipótesis que, posteriormente, se extendería a toda la materia. • Se rechaza el concepto de <i>elemento aristotélico</i> y se introduce la idea de sustancia simple (elemental), como aquella sustancia que ya no es susceptible de ser separada mediante manipulaciones en el laboratorio. Se supone que todas las sustancias (elementales y compuestas) están formadas por unos pocos elementos químicos. • Se interpretan los cambios químicos como cambios sustanciales (formación de nuevas sustancias) que pueden ser explicados por la conservación de los elementos que entran en la composición de los reaccionantes. Esto conlleva la elaboración de tablas de afinidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Comienza a aceptarse el concepto empírico (macroscópico) de <i>sustancia</i>, pero la idea de compuesto químico que se deriva de las tablas de afinidad no fue fácilmente aceptada por la comunidad científica del siglo XVIII. • La definición operacional de sustancia simple depende coyunturalmente de los procedimientos conocidos en aquella época para descomponer las sustancias. • Subsisten las dificultades respecto a la diferenciación entre mezcla de sustancias simples y compuesto formado por los elementos que entran en su composición. Todavía no quedaba resuelta la cuestión de los mixtos, porque era muy difícil pensar que un compuesto fuera una única sustancia con propiedades específicas y, al mismo tiempo, se asumiera la conservación de los elementos que lo componen. • El conocimiento de los cambios químicos se basa en los resultados empíricos de las operaciones químicas de composición (síntesis) y descomposición (análisis) de sustancias. • No es creíble la existencia de una gran cantidad de elementos para explicar la diversidad de sustancias conocidas y sus transformaciones químicas.

cida entre Proust y Berthollet que, prácticamente, pasó desapercibida para la comunidad científica de finales del siglo XVIII (Bensaude-Vincent y Stengers, 1997). Lo que sí se consiguió durante el siglo XVIII fue el abandono de la idea de que todos los sistemas materiales presentes en la naturaleza eran mezclas de elementos y principios representativos de algunas propiedades, al asumirse que todas las mezclas se podían resolver en sustancias simples y/o compuestas. Todas estas sustancias estarían formadas por un número determinado de elementos químicos, ahora ya con un carácter más realista y próximo a los referentes empíricos conocidos como «cuerpos simples». Se aceptaba así la definición operacional de compuesto químico como sustancia de composición definida, como ya había planteado Geoffroy anticipándose a los conocimientos del momento (Klein, 1996). No obstante, conviene resaltar que Lavoisier en sus trabajos no otorgó a las sustancias simples el carácter ontológico de *elementos* (Rocke, 1986). Lo que sí hizo fue definir empíricamente las sustancias simples como aquellas que ya no pueden ser descompuestas en otras más simples y, por tanto, era consciente de las limitaciones de estas definiciones operacionales al hacerlas dependientes de los procedimientos conocidos en su época.

En el cuadro 2 se resume la explicación que daba este modelo histórico de los filósofos de la naturaleza de los siglos XVI al XVIII a la composición de los materiales ordinarios mediante la introducción macroscópica de los conceptos de *sustancia* y *compuesto químico*. Interesa resaltar que este nuevo modelo macroscópico viene a sustituir al anterior modelo macroscópico aristotélico-escolástico. Estos nuevos conceptos serían reinterpretados microscópicamente más adelante mediante la hipótesis atómica de Dalton.

c) La teoría atómica clásica de la materia interpreta microscópicamente los conceptos de *elemento*, *sustancias elementales*, *compuesto* y *reacción química*, así como la conservación de los elementos en este proceso

El concepto de *sustancia simple*, como aquella que no puede ser descompuesta, había empezado a gestarse a lo largo del siglo XVII, pero esta definición operacional no se hizo efectiva hasta que fue propuesta por Lavoisier (Fernández, 1999). A partir de este momento fue posible comprender macroscópicamente el cambio sustancial que se producía en una reacción química, al poder relacionar las sustancias reaccionantes con los productos, incluidos los gases, mediante la conservación de los elementos químicos (concebidos inicialmente como sustancias simples desde un punto de vista empirista) y de la masa que había mostrado Lavoisier.

Para poder llegar a construir la química como ciencia moderna era necesario establecer definiciones ontológicas sobre las sustancias y los fenómenos químicos compatibles con la estructura corpuscular que ya había propuesto Bernoulli para explicar las propiedades físicas generales de los gases en el siglo XVIII. Es decir, no se disponía de una representación microscópica general de las sustancias, en cualquier estado, y de los cambios sustanciales en las reacciones químicas y ésta sería la tarea a la que contribuyó especialmente John

Dalton. Su hipótesis atómica de la materia nació a principios del siglo XIX, pero su consolidación se prolongó durante todo el siglo (Rocke, 1986; Brock, 1998), tras continuas y profundas discrepancias entre los representantes de los dos paradigmas existentes en la comunidad científica: el equivalentista y el atomista. El principal objetivo del programa de investigación de los equivalentistas era la búsqueda y obtención de las relaciones ponderales de combinación de las sustancias. Una vez descubiertas estas relaciones matemáticas, se esperaba inducir una ley general explicativa, al igual que había ocurrido en la física. Para ello, los equivalentistas orientaban sus trabajos empíricos hacia la búsqueda de los elementos químicos, poniendo en cuestión la teoría atómica. Por su parte, los atomistas proponían una explicación ontológica, según la cual la materia estaría dividida en partículas ínfimas, indivisibles, idénticas para el mismo cuerpo simple, que se agruparían de manera diferente en cada compuesto. El primer intento de explicación cuantitativa del cambio químico según el modelo macroscópico empirista citado anteriormente lo proporcionó la hipótesis atómica de Dalton en 1805. Por primera vez en la historia de la química, los átomos o últimos invariantes eran principios físicos y químicos a un tiempo, ya que eran las partículas que suponía la geometría, así como los últimos productos del análisis químico (Boas, 1969). Es decir, el modelo microscópico atomista aportó un marco teórico adecuado para explicar las ideas recientes asumidas en el modelo macroscópico empirista y, en particular, las leyes de las proporciones constantes de combinación de Proust y la ley de la conservación de la masa de Lavoisier. Cabe resaltar que, especialmente, este nuevo marco microscópico aportó concreción y comprensión a la idea macroscópica de elemento químico al asociarlo a un conjunto de átomos iguales en masa.

A continuación, el cuadro 3 muestra cómo el modelo atómico de Dalton aportó una nueva visión ontológica con la que interpreta los fenómenos químicos y las dificultades que posteriormente se le plantearon.

¿QUÉ DIFICULTADES PUEDEN TENER LOS ESTUDIANTES RESPECTO A LOS CONCEPTOS DE SUSTANCIA Y COMPUESTO QUÍMICO?

La investigación educativa ha mostrado la existencia de numerosas dificultades entre los estudiantes que se inician en el aprendizaje de la química tanto desde el punto de vista macroscópico como microscópico (Benarroch, 2000; Harison y Treagust, 2002; Kabapinar, Leach y Scott, 2004). Por ejemplo, a pesar de que la definición operacional de sustancia es fundamental para la comprensión de otros conceptos derivados, como *compuesto* o *cambio químico*, muchos alumnos no llegan a comprender su significado (Stavridou y Solomonidou, 1989), confundiéndolo con otros conceptos más generales como *material* o *producto* (Furió y Domínguez, 2001). Una de las causas de esta dificultad deriva de su experiencia cotidiana, según la cual diferencian entre material y no material (Andersson, 1990; Stavy, 1991a y 1991b), considerando material todo aquello que se puede ver, tocar, tiene masa y, por tanto, peso, quedando así excluidos los gases (Hernández, 1997).

Cuadro 3

El modelo atómico de Dalton proporciona una nueva visión ontológica de los fenómenos químicos, interpretando microscópicamente lo que son sustancias elementales, compuestos, elementos químicos y reacciones químicas.

REFERENTES EMPÍRICOS	DESCRIPCIÓN Y EXPLICACIÓN	DIFICULTADES Y PROBLEMAS
<ul style="list-style-type: none"> • Cualquier sistema material ordinario puede catalogarse como: <ul style="list-style-type: none"> – Mezcla (de sustancias) – Sustancia • Las sustancias se pueden descomponer, o no, en el laboratorio. En el primer caso se trata de sustancias compuestas. Las sustancias simples serían las últimas obtenidas en el análisis de los compuestos. Tanto las simples como las compuestas estarían formadas por los elementos químicos concebidos como principios fundamentales. • Una sustancia se puede descomponer en las sustancias simples que la componen (análisis) y, posteriormente, volver a unirse en las mismas proporciones, formando nuevamente la sustancia de partida (síntesis). • En una reacción química, a partir de unas sustancias se producen otras diferentes conservándose la masa total del sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cada sustancia está formada por <i>muchísimas partículas iguales</i>, cuya composición y estructura determinan las propiedades características de la misma. En cambio, las propiedades de la mezcla dependen de la proporción en que se encuentre cada una de las sustancias que la forman. • En este modelo microscópico daltoniano cada elemento se define como un tipo de material ideal (sin estructura) formado por muchísimos átomos todos iguales en masa y volumen. • Las partículas más pequeñas que forman cada sustancia pueden estar compuestas, a su vez, por átomos iguales o diferentes. En el primer caso se tratará de una sustancia elemental (simple) formada por átomos de un elemento y, en el segundo, será una sustancia compuesta cuyas partículas estarán formadas por dos o más átomos de diferentes elementos. Esta composición constante de las partículas de los compuestos explica la ley de las proporciones definidas de Proust. • Cuando ocurre una reacción química se produce una interacción entre las partículas de las sustancias reaccionantes, con lo que los átomos que las forman se agrupan de forma diferente, dando lugar a nuevas partículas, que forman las sustancias obtenidas. • La conservación del número de átomos de cada elemento en el proceso químico explica la ley de la conservación de la masa total del sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> • Existe el peligro de identificar la definición operacional de sustancia simple (elemental) con el de elemento químico asociado a conjunto de átomos iguales pero sin estructura (modelización). • Un mismo elemento químico puede entrar en la composición de varias sustancias simples. El estatus epistemológico del elemento químico, en este modelo, no es el mismo que el operacional de sustancia simple en el modelo empirista. Una «misma sustancia simple» se presentaba en distintas formas denominadas alotrópicas (que, según el modelo empirista, corresponden a distintas sustancias elementales ya que tienen distintas propiedades), lo que se ha de explicar con la existencia de distintas estructuras moleculares. • En algunos procesos como la formación de aleaciones, vidrios, disoluciones acuosas de sales, etc. no queda clara la diferenciación entre procesos físico y químico. • A finales del siglo XIX se constató que no todos los átomos de una misma sustancia elemental tenían la misma masa (isótopos). • Este modelo no puede explicar algunos problemas, como los iones, descubiertos a finales del XIX, la existencia de los electrones o la radiactividad. Todo ello apuntaba a que los átomos no eran realmente indivisibles, sino que, a su vez, estaban formados por partículas más pequeñas adjetivadas como «elementales».

Por otra parte, cuando pasamos al mundo microscópico la idea de átomo es manejada muy superficialmente por los estudiantes, no le conceden importancia y no la utilizan en sus interpretaciones de los fenómenos químicos (Mortimer, 2001; Harrison y Treagust, 2002; Meheut, 2004). En el caso que nos ocupa, el que los alumnos no tengan una representación microscópica adecuada del concepto estructurante de *sustancia* puede favorecer que consideren un compuesto como una mezcla aleatoria de átomos (Ben-Zvi et al., 1986). Dado que tanto en la mezcla como en el compuesto intervienen, como mínimo, dos componentes, esta dificultad puede comportar problemas para diferenciar las mezclas de los compuestos.

Otra dificultad que se puede derivar de la falta de comprensión del concepto de *sustancia*, es la posibilidad, o no, de diferenciar el cambio físico del químico, ya que la conservación de la sustancia explica los cambios físicos, mientras la transformación y no conservación de las mismas ofrece el fundamento de la explicación macroscópica dada a los cambios químicos (Johnson, 1996). Por el contrario, el alumnado no se basa en criterios científicos, sino en otros más superficiales (Bullejos, 2001) como, por ejemplo, considerar los fenómenos

químicos como artificiales (Solomonidou y Stavridou, 1994). En algunas ocasiones, los estudiantes sustancializan la propiedad, confundiéndola con la sustancia misma (Sanmartí, 1989; Sanmartí, Izquierdo y Watson, 1995), mientras en otros casos no entienden que un cambio de propiedades presupone un cambio de sustancias y piensan que, aunque perciban alguna variación, como por ejemplo el color, la sustancia continúa siendo la misma (de Vos y Verdonk, 1985; Driver et al., 1994), razón por la cual no pueden inferir si se ha producido un cambio químico o no.

A pesar de todas las dificultades puestas de manifiesto por la investigación en Didáctica de las Ciencias, nuestra hipótesis es que la enseñanza habitual no pone énfasis en que los estudiantes adquieran, en primer lugar, las definiciones operacionales de sustancia, sustancia simple, compuesto y reacción química necesarias para una posterior interpretación microscópica de estos fenómenos. Por el contrario, se entrará directamente a la enseñanza del mundo microscópico, con ayuda del nivel simbólico, creyendo ingenuamente que estas explicaciones se asociarán fácilmente con los referentes macroscópicos supuestamente ya «conocidos». Es por ello que suponemos que

los estudiantes tendrán dificultades de comprensión, tanto en el nivel de representación macroscópica, como en el microscópico. En particular existe literatura que muestra las dificultades que tienen los estudiantes en la utilización y comprensión del modelo corpuscular de la materia (Benarroch, 2000; Harrison y Treagust, 2002; Kavapinar, Leach y Scott, 2004). Posiblemente, sus representaciones estarán próximas a una química de *sentido común*, parecida en algunos rasgos muy generales a las del modelo macroscópico aristotélico-escolástico, aunque sin las connotaciones filosóficas atribuidas a los elementos en un contexto social y cultural tan distinto al actual. No obstante, es de esperar cierta ambigüedad en los modelos mentales que presenten los estudiantes, en particular, cuando manifiesten sus representaciones respecto a las ideas macroscópicas sobre los conceptos de *sustancia* y de *compuesto químico*.

DISEÑO EXPERIMENTAL PARA PONER A PRUEBA LA EXISTENCIA DE DIFICULTADES EN LA COMPRENSIÓN DE LOS CONCEPTOS DE SUSTANCIA Y COMPUESTO QUÍMICO

Se ha elaborado un diseño variado y convergente consistente en un cuestionario formado por cuatro cuestiones de respuesta abierta (Anexo 1) y una entrevista ante fenómeno (Anexo 2). Ambos instrumentos se aplicarán a muestras significativas de estudiantes de bachillerato de entre 16 y 18 años de los dos últimos planes de estudio (BUP/COU y bachillerato científico actual).

Las pruebas se realizaron en sesión de clase, sin aviso previo y hacia el final del curso escolar, cuando los alumnos habían estudiado la materia objeto del trabajo durante uno, dos o tres cursos, de los que los dos últimos habían escogido la química como materia optativa. La primera prueba (Anexo 1) consiste en una serie de ítems cuyo objetivo era conocer el pensamiento de los estudiantes respecto de los conceptos macro y microscópico de *sustancia*, *sustancia simple* y *compuesta*, *mezcla* y *reacción química*. En el primero de los ítems se les pide que elaboren un mapa conceptual a partir de un conjunto de términos básicos en el aprendizaje de la química con el objetivo de que expliciten cómo relacionan unos conceptos con otros, cuáles consideran más generales y cuáles están subordinados. En particular, se pretende ver cómo relacionan los conceptos de *materia* y *sustancia* así como los de *mezcla* y *compuesto*. Todos los estudiantes encuestados habían sido previamente entrenados en la realización de mapas conceptuales de ciencias naturales con términos muy familiares.

Con las entrevistas ante fenómeno se pretende triangular las fuentes de obtención de datos y analizar si los resultados obtenidos son convergentes no sólo cuando se pregunta a los estudiantes en el contexto de la composición de materiales sino también en el de las reacciones químicas que pueden sufrir estos materiales. El esquema seguido en las entrevistas es el siguiente: se comienza presentando al alumno un conjunto de materiales distintos y se les pide que indiquen cuál o cuáles

de ellos consideran que son una única sustancia. Una vez han contestado, se solicita que dibujen una posible estructura microscópica de lo que para ellos sería una sustancia seleccionando uno de los materiales que han escogido. El objetivo de las preguntas es determinar qué significados atribuyen al concepto de *sustancia*, en los dos niveles, macroscópico y microscópico. En la segunda parte de la entrevista, se llevan a cabo ante ellos diversas experiencias y, en cada una de ellas, se solicita que expliquen lo que suponen que ha sucedido desde el punto de vista macroscópico, al tiempo que deben dibujar la que suponen que es la explicación microscópica. A lo largo de la conversación se insiste en que expliciten al máximo sus respuestas, en particular cada vez que utilizan las palabras *sustancia*, *mezcla*, *compuesto*, *elemento*, *cambio físico* o *reacción química*, con el objetivo de determinar qué entienden por cada uno de estos conceptos. En este trabajo se presenta en el anexo 2 la entrevista elaborada para el caso de la descomposición térmica del azúcar.

La muestra de estudiantes que han cumplimentado el cuestionario consta de un total de 381, escogida de forma aleatoria desde hace algunos años en tres centros de la provincia de Valencia, de los cursos y edades que se indican a continuación:

Curso	Edades	N
2º BUP	16	60
3º BUP	17	36
1º bachillerato	17	104
COU	18	47
2º bachillerato	18	134
Total alumnos		381

En las entrevistas participaron un total de 45 estudiantes, de los mismos niveles que los anteriores, escogidos únicamente en razón de su disponibilidad a participar en las mismas. Todas fueron grabadas en audio para su posterior transcripción y análisis.

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN EL APRENDIZAJE DE LOS CONCEPTOS DE SUSTANCIA, COMPUESTO QUÍMICO Y REACCIÓN QUÍMICA

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas, incluyendo tanto los cuantitativos como los cualitativos más representativos. Comenzaremos por ofrecer los resultados relativos a las dificultades para diferenciar, en el nivel macroscópico, entre material y sustancia y seguidamente, analizaremos los ítems que nos permitirán apreciar si se presentan dificultades en torno a los conceptos de *mezcla* y *compuesto*. A continuación se pasará a mostrar las dificultades que se aprecian en la diferenciación microscópica entre los conceptos de *sustancia* y *sustancia simple*.

Dificultades para diferenciar material de sustancia en el nivel macroscópico

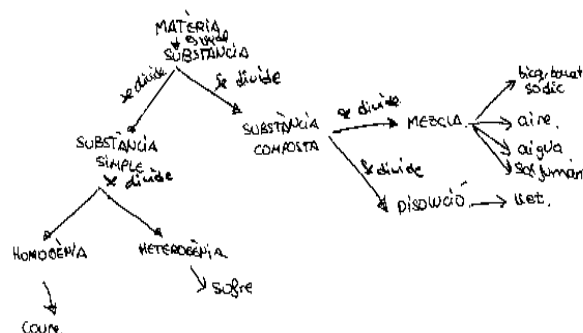
Para determinar si los estudiantes saben diferenciar, macroscópicamente, entre una mezcla (como puede ser la gran mayoría de los materiales o productos cotidianos) y una sustancia, se procedió a realizar dos pruebas. La primera consistió en hacerles construir un mapa conceptual, en el que habían de relacionar entre sí el conjunto de palabras que se les ofrecían (ítem 1 del cuestionario). El objetivo principal no era ver si realizaban una clasificación correcta de los conceptos desde el punto de vista científico, sino averiguar qué relaciones de subordinación establecían los estudiantes entre los pares de conceptos básicos *materia-sustancia* y *mezcla-compuesto*.

Ítem 1. Haz un mapa conceptual utilizando las siguientes palabras: heterogénea, azufre, compuesto (o sustancia compuesta), mezcla, sal fuman, aire, agua, sustancia simple, homogénea, materia, sustancia, cobre, leche, disolución, bicarbonato sódico.

Utiliza todas las conexiones necesarias, explicando en qué te basas para establecer estas relaciones o conexiones.

Para comprender mejor cómo se ha efectuado la valoración de las respuestas dadas por los estudiantes, se presenta, a título de ejemplo, el mapa conceptual elaborado por un alumno de 3º de BUP, representativo de una forma de pensamiento muy generalizada (Fig. 1).

Figura 1
Ejemplo prototípico de mapa conceptual elaborado por un alumno de 3º de BUP.



En primer lugar, podemos ver que el estudiante identifica los conceptos de *materia* y *sustancia*, poniendo a veces entre ambas palabras el conector «es igual». Además, este estudiante considera el concepto de *compuesto* más general que el de *mezcla*, ya que divide las sustancias compuestas en mezclas y disoluciones, como si fueran formas distintas de compuestos. La tabla 1 muestra los porcentajes encontrados en cada una de las categorías de respuesta dadas por los estudiantes en función del curso en el que se encontraban.

Tabla 1
Resultados obtenidos en el mapa conceptual sobre las relaciones entre materia-sustancia y mezcla-compuesto en estudiantes de bachillerato (N = 346).

CATEGORÍAS DE RESPUESTA	2º BUP (N = 60) %	3º BUP 1º BACH (N = 120) %	COU 2º BACH (N = 166) %	Total (N = 346) %
Clasifican los sistemas materiales en sustancia y mezcla (*)	18,3	17,5	15,1	16,5
Identifican materia y sustancia	46,7	45,0	42,2	41,0
No aparece la palabra sustancia	13,3	11,7	12,0	12,1
Incodificables	38,3	25,8	30,7	30,3
Subordinan compuesto a sustancia (*)	35,0	34,2	38,0	36,1
Subordinan mezcla a compuesto o identifican mezcla y compuesto	48,3	45,0	51,2	48,6
Otras respuestas	16,7	20,8	10,8	15,3

* Respuestas correctas

De la tabla 1 se desprende, en primer lugar, que no hay diferencias apreciables entre los diferentes grupos de edad, con porcentajes de respuestas correctas similares (en un promedio de 16,5%) en los que el término *sustancia* se subordina a *materia* y se opone a *mezcla*, es decir, no se identifica materia y sustancia. Los porcentajes más elevados son los de aquéllos que identifican los conceptos de *material* y *sustancia* (41,0%), a los que cabría añadir aquéllos que no hacen aparecer la palabra *sustancia* (12,1%) y derivan el resto del mapa directamente de la palabra *materia*, suponemos que por identificar implícitamente estos dos conceptos. Es decir, se puede afirmar que, como mínimo, más de la mitad de todas las muestras identifica materia y sustancia.

De la misma forma, es muy significativo que, casi la mitad de los alumnos, explicitan que el término compuesto incluye al de mezcla, lo que significa que la mezcla es una clase de compuesto (48,6%). Nuestra interpretación es que, el hecho de que los estudiantes no hubieran adquirido la definición operacional de sustancia les impide disponer de un criterio procedimental para reconocer si en un sistema material hay una o más sustancias. Es por ello que los estudiantes no pueden distinguir entre mezcla y compuesto y, por ejemplo, suelen considerar las disoluciones como compuestos, de la misma forma que sucedió históricamente en la polémica Proust-Berthollet a fines del siglo XVIII (Bensaude-Vincent y Stengers, 1998).

Como diseño complementario al anterior se elaboró una segunda prueba consistente en una cuestión escrita (ítem 2), cuyo objetivo era determinar si distinguían entre una sustancia y una mezcla también a nivel macroscópico, para lo que debían indicar, de entre varios sistemas materiales, cuáles estaban formados por una única sustancia.

Ítem 2. Actualmente todos hemos oído hablar de: luz, aire, agua, fuego, granito, onda de radio. Subraya los que crees que están formados por una única sustancia. Explica en qué te basas y por qué crees que los otros no lo son.

La cuestión está planteada de manera que los sistemas materiales utilizados recuerdan a los elementos aristotélicos, es decir, el aire, el agua, el fuego, la tierra (granito) y, por último, la luz y la onda de radio, que podrían asimilarse al éter aristotélico. Los resultados obtenidos se ofrecen en la tabla 2. Las respuestas obtenidas fueron

muy ricas y tuvieron que ser analizadas en profundidad por dos investigadores con el fin de categorizarlas.

En el análisis de las respuestas a la cuestión 2, hemos considerado correctas todas aquéllas en las que se indicaba que la única sustancia era el agua, aunque no dieran ninguna explicación o, poniéndonos en la situación más desfavorable a la hipótesis de esta investigación, aquéllas otras en las que se deducía de la explicación que la respuesta acertada había sido aleatoria, o bien contenía alguna incorrección conceptual (respuestas que hemos agrupado bajo el epígrafe «casi correctas»). A pesar de ello, estas respuestas sólo representan un pequeño porcentaje (7,9%). Entre las respuestas incorrectas encontramos algunas que, recordando las ideas escolásticas, aseguran que no hay nada puro y todo está formado por mezclas, identificando así material con sustancia. Mostramos a continuación algunos ejemplos de estas respuestas en las que se incluyen entre paréntesis las interpretaciones dadas por los autores a algunas de las palabras de los estudiantes:

- Todos son sustancias. Una sustancia es cada cosa que puedes ver, que puedes tocar o que tú sabes que está ahí. Los elementos no, los elementos están en la tabla periódica para estudiar las sustancias (Estudiante 1 de COU).

- Ninguno de los ejemplos nombrados es una **sustancia** (simple o elemento), porque el aire está formado por N₂, O₂, C y otras sustancias. El agua por H y O, el fuego por C, O, N₂, etc., el granito por moléculas de C, Fe, O y Ca y la luz y las ondas no lo sé, porque son **sustancias** (compuestas) que están formadas por varias **sustancias** (simples o elementos) (Estudiante 2 de COU).

En la primera respuesta, el estudiante 1 afirma que sustancia es todo aquello que se puede ver o tocar... identificando así los conceptos de *material* y *sustancia* en una respuesta que nos recuerda la idea escolástica de materia corpórea. En la segunda parte de la respuesta, este estudiante razona acertadamente que los elementos que aparecen en la tabla periódica no son sustancias (se interpreta que el estudiante quiere decir que no son materiales reales sino abstracciones) pero sirven para «estudiar las sustancias» (suponemos que quiere decir para explicar su comportamiento). El segundo ejemplo de respuesta del estudiante 2 es más complejo y aparentemente parece contrario al primero, pero un análisis más detenido permite mostrar que, en el fondo, son similares.

Tabla 2
Porcentaje de estudiantes de bachillerato (N = 381) que identifican material y sustancia.

CATEGORÍAS DE RESPUESTA	2º BUP (N = 60) %	3º BUP 1º BACH (N = 140) %	COU 2º BACH (N = 181) %	Total (N = 381) %
Dan una respuesta correcta o casi correcta	5,0	10,0	7,2	7,9
Identifican sustancia y material	71,7	69,3	72,9	71,4
Otras respuestas	23,3	20,7	19,9	20,7

Este estudiante emplea dos acepciones diferentes para la palabra *sustancia*. En la primera y segunda líneas, el término *sustancia* interpretamos que se asocia con la idea de sustancia simple o elemento químico. Por tanto, el agua, el aire, el granito y el fuego serían materiales (mezclas o compuestos) formados por «*varias sustancias*» que, según nuestra interpretación, se consideran tácitamente como más simples (tal vez pensando en la idea de elementos químicos). En cambio, el significado que le da a la palabra sustancia de la tercera línea, al referirse a la luz y las ondas, es el de sustancia compuesta o material, formada por otras sustancias (más simples o elementos). Por ello, para este estudiante, todos los ejemplos presentados son «sustancias» (materiales en sentido amplio), es decir, mezclas o compuestos, pero no sustancias simples o elementos químicos.

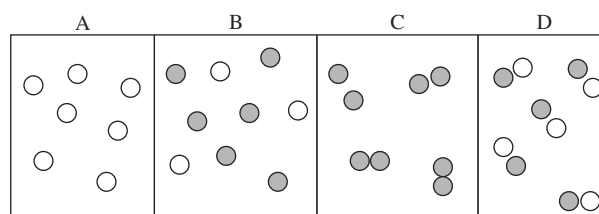
En resumen, los resultados encontrados nos permiten suponer que la mayoría de los estudiantes, al no disponer del concepto macroscópico de *sustancia* opuesto al de *mezcla*, piensa que «*todos los materiales que se nos presentan son mezclas (o sustancias), formadas por otras sustancias puras más simples*», que suponemos serán los elementos químicos. Sería, en cierto modo, un modelo mental o una forma de pensar similar al paradigma aristotélico en cuanto a que se simplifica la complejidad de la composición de los materiales existentes al manifestar explícitamente que todos son mezclas. Se comprende así que se utilice el término «sustancia pura» ya que se presupone que existen, por oposición, «sustancias impuras». La existencia de este modelo explica también por qué la mayoría de los estudiantes (71%) identifica el concepto macroscópico de *sustancia* con el de *material* que, en general, es considerado como una mezcla o un compuesto. O que prácticamente la mitad de los estudiantes (48,6%) que realizaron el mapa conceptual consideren que los compuestos se pueden clasificar en mezclas homogéneas (disoluciones) y heterogéneas.

Dificultades para diferenciar mezcla de compuesto a nivel microscópico

Con el objetivo de ver si en el nivel microscópico los estudiantes distinguen una mezcla de un compuesto,

se planteó el ítem 3 del cuestionario (Anexo I), que se muestra a continuación. En la tabla 3 se presentan los porcentajes de respuesta encontrados.

Ítem 3. Los dibujos siguientes representan gases. Cada bolita simboliza un átomo y las del mismo color son átomos idénticos. Indica cuál o cuáles de ellos pueden ser una mezcla. Justifica tu respuesta.



El análisis de los resultados expuestos en la tabla 3 muestra que más de un 60% de estudiantes de todos los grupos de edad confunden mezcla y compuesto. Además, es significativo que prácticamente no haya apenas diferencias entre las muestras de diferentes niveles educativos a pesar de que va aumentando el número de cursos de química recibidos por los estudiantes. En sus explicaciones se observa que no se trata de respuestas aleatorias, sino que son conscientes de lo que afirman, como se puede apreciar en las siguientes contestaciones, en las que las aclaraciones entre paréntesis han sido añadidas por los autores de la investigación:

• B y D (son mezclas) porque están formados por átomos diferentes, ya sean simples o compuestos (estudiante 1 de 2º de BUP).

• B y D porque están formados por átomos blancos y negros, cosa que me dice que cada uno (de los dibujos) tiene una composición y todos (los átomos) juntos forman una mezcla (estudiante 1 de 2º de bachiller).

El estudiante 1 de 2º de BUP habla de átomos diferentes cuando, en realidad, debería hablar de partículas que contienen átomos diferentes. Además, es interesante fijar la atención en el uso del término «*átomos simples o compuestos*» para indicar si las partículas están constituidas por un único átomo o por dos átomos diferentes (*átomos compuestos*). Por su parte, la respuesta del estudiante de

Tabla 3
Porcentaje de alumnos de BUP y bachillerato (N = 381) que identifican una mezcla con un compuesto a nivel microscópico.

CATEGORÍAS DE RESPUESTA	2º BUP (N = 60) %	3º BUP 1º BACH (N = 140) %	COU 2º BACH (N = 181) %	Total (N = 381) %
Respuesta correcta (B)	25,0	32,1	27,1	28,6
Identifican mezcla y compuesto (B y D)	63,3	60,7	64,1	62,7
Incodificables	11,7	7,1	8,8	8,7

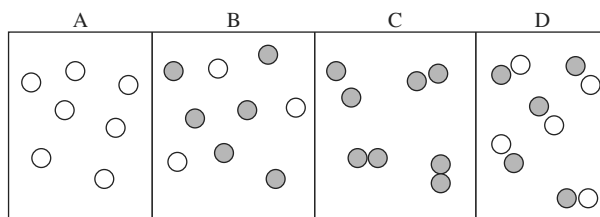
2º de bachiller hace referencia a que la mezcla B y el compuesto D son mezclas que solamente difieren en su composición, es decir, en la proporción del número de átomos de cada tipo, sin tener en cuenta la estructura de sus partículas.

La conclusión que extraemos es que, cuando la muestra está formada por más de un tipo de átomos, independientemente de que se encuentren enlazados o no, la mayoría de estudiantes no diferencia entre mezcla y compuesto. Esta manera de pensar es coherente con la no diferenciación macroscópica entre mezcla y compuesto que se ha obtenido en el apartado anterior.

Dificultades en la diferenciación microscópica entre los conceptos de *sustancia* y *sustancia simple*

Con el objetivo de ver las representaciones de los alumnos respecto de lo que es una sustancia desde el punto de vista microscópico se elaboró el ítem 4 del cuestionario (Anexo I). Se supone que, si los alumnos clasifican macroscópicamente los sistemas materiales en sustancias simples o elementos y mezclas o sustancias compuestas, asocien, en el nivel microscópico, la primera clase con la presencia de partículas con átomos iguales y la segunda con partículas con átomos distintos, independientemente de cuáles sean las estructuras de dichas partículas. Es decir, no aplicarán el concepto microscópico de *sustancia* constituida por un conjunto de partículas iguales con la misma composición y estructura, es decir que tienen grupos de átomos iguales (sustancias simples) o distintos (compuestos). En cambio, una mezcla de sustancias tendrá partículas desiguales en composición y/o estructura. Así pues, es de esperar que si un estudiante piensa que son sustancias solamente las sustancias simples constituidas por el mismo tipo de átomos, seleccionarán los casos A y/o C. Coherentemente no se considerará sustancia la respuesta D, que representa un compuesto. En la tabla 4 se presentan los porcentajes de respuestas correctas e incorrectas desde el punto de vista daltoniano.

Ítem 4. Los dibujos siguientes representan gases. Cada bolita simboliza un átomo y las del mismo color son átomos idénticos. Indica cuál o cuáles de ellos pueden ser una sustancia. Justifica tu respuesta.



Como se puede apreciar en la tabla 4, casi un 70% de estudiantes de cada una de las submuestras consideran que sólo son sustancias las sustancias simples, confirmando así en sus explicaciones:

- Son sustancias A y C porque están formadas por átomos de la misma sustancia (estudiante 1 de 3º de BUP).
- Porque sólo son sustancias puras las que tienen el mismo tipo de átomos, sin importar que reaccionen entre ellos o vayan separados (estudiante 2 de 2º de BUP).

En el primer ejemplo, el estudiante indica que en A y C hay *átomos de la misma sustancia*, tal vez dándole el significado de átomos de la misma clase, es decir, reduce el concepto de *sustancia* al de *sustancia simple*. Por su parte, el segundo ejemplo incide en la interpretación anterior pero es más explícito al definir como sustancia pura la formada por un conjunto de átomos iguales *sin importar que reaccionen* (seguramente quiere decir que vayan unidos) *entre ellos o vayan separados*.

Las respuestas anteriores ponen de manifiesto que, en el nivel de representación microscópica, la mayoría de los estudiantes (siete de cada diez) asocian la palabra *sustancia* o la expresión sustancia pura con el concepto de *sustancia simple* formada por átomos iguales.

Llama la atención que, como habíamos visto en el apartado anterior, el término sustancia se utilizaba en el nivel macroscópico por la mayoría de los estudiantes como sinónimo de material o mezcla y, en cambio, en este ítem lo asocian con sustancia simple, en el nivel microscópico. Esta aparente contradicción de los estudiantes puede explicarse al no saber distinguir –y por tanto relacionar adecuadamente– los niveles macro y microscópico de definición del término sustancia química que introdujeron los modelos históricos empirista y atomista, respectivamente.

Tabla 4
Resultados referentes al concepto microscópico de *sustancia* (N = 381).

CATEGORÍAS DE RESPUESTA	2º BUP (N = 60) %	3º BUP 1º BACH (N = 140) %	COU 2º BACH (N = 181) %	Total (N = 381) %
Respuesta correcta (A, C y D)	16,7	13,6	12,7	13,7
Asocia sustancia con sustancia simple (A y C)	66,7	69,3	70,2	69,3
Otras respuestas	16,7	17,1	17,1	17,1

Dificultades en la categorización de un cambio como físico o químico

Finalmente presentaremos y analizaremos los resultados obtenidos en una prueba elaborada con el objetivo de ver si los estudiantes tienen dificultades para saber si un proceso es químico y qué relación existe entre estas dificultades y las atribuidas al concepto de *sustancia*. Esta prueba ha consistido en la aplicación de una entrevista semiestructurada en la que se presenta la descomposición térmica de un poco de azúcar en un tubo de ensayo, y se pide al alumno que explique macroscópicamente lo que opina sobre el fenómeno y, también, dibuje, a nivel microscópico, lo que ha sucedido.

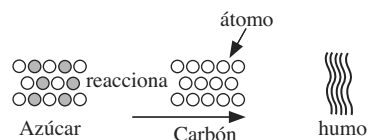
Como ejemplo de resultado cualitativo obtenido en estas entrevistas, se ha seleccionado la realizada por Pau, alumno de 1º de bachillerato, por considerarla representativa del pensamiento de una mayoría de los estudiantes entrevistados, así como por ser suficientemente explícita sobre las dificultades relacionadas con el contenido de este trabajo. En el experimento realizado ante el estudiante, se ha calentado fuertemente un poco de azúcar contenido en un tubo de ensayo, con lo que queda un re-

siduo negro de aspecto carbonoso al fondo y se observa cómo la parte superior del tubo de ensayo se empaña con unas gotas. A continuación se presenta la transcripción de esta entrevista.

Una primera interpretación que hacemos del discurso de Pau es la consideración de que los átomos de humo no se pueden ver, aunque sí podríamos hacerlo si «*los pasamos a líquido otra vez*» (líneas 24 y 25), efectuando así una transferencia de propiedades macro-micro inadecuada. Además, este alumno sustancializa el sabor cuando, en las líneas 8 y 9, afirma que «*igual el compuesto que endulza el azúcar, el elemento que endulza el azúcar se ha evaporado al quemarlo*». Por otra parte, identifica los conceptos de *mezcla* y *compuesto* al considerar que el azúcar está formado por una mezcla de lo que observa que ha quedado después de la reacción (líneas 11 a 13). Esta dificultad es coincidente con la diagnosticada en los ítems 1 y 2 del cuestionario.

Por otra parte, en el dibujo en el que explica microscópicamente lo que cree que ha sucedido, simboliza el azúcar mediante bolas blancas y negras juntas, lo que para él puede representar un compuesto (sin composición defi-

- 1 Profesora. ¿Puedes explicar lo que ha pasado?
- 2 Pau. Hay una reacción en la que se separan[...] no, en la que se quema el azúcar. Hay una
- 3 oxidación, una reacción química. Se separa una sustancia, que se evapora y abajo se
- 4 queda una sustancia líquida o no queda nada, porque está negro y no se ve nada.
- 5 P. ¿Qué crees que es lo que ha quedado en el tubo?
- 6 Pau. Es carbón, ¿no? Sí. Es azúcar quemado.
- 7 P. Si es azúcar quemado, ¿estará dulce?
- 8 Pau. No tiene porque. Igual el compuesto que endulza el azúcar, el elemento que endulza
- 9 el azúcar se ha evaporado al quemarlo.
- 10 P. Si en el tubo de ensayo sólo habíamos puesto azúcar, ¿de dónde ha salido el carbón?
- 11 Pau. Ha salido de separarse[...] o sea, el azúcar estará compuesto de carbón y de sacarosa,
- 12 o glucosa o algún producto que le da el sabor dulce y al evaporarse lo otro, ha quedado
- 13 el carbón.
- 14 P. ¿Qué tipo de proceso piensas que ha ocurrido?
- 15 Pau. Una separación. Una reacción. Se ha separado un gas de un [...] se ha separado
- 16 un sólido que se ha transformado en gas y en un sólido.
- 17 P. Y el gas, ¿de dónde ha salido? ¿Dónde estaba antes?
- 18 Pau. En el azúcar. Dentro del azúcar.
- 19 P. ¿Podrías hacer un dibujo que represente lo que dices?



- 20 Pau. En principio tenemos azúcar y abajo, el carbón. Cada bola blanca es un átomo de carbón.
- 21 Y el humo son las bolas que tendrán una temperatura de ebullición más baja y,
- 22 por eso, se ha evaporado.
- 23 P. Has dibujado los átomos de carbón. ¿El gas no tiene átomos?
- 24 Pau. Sí que tiene átomos, pero no los puedes ver. Si eso lo pasas a líquido otra vez,
- 25 podrás ver los átomos.
- 26 P. O sea, que los átomos sólo se pueden ver en caso de un sólido o un líquido y en los
- 27 gases no, ¿es así?
- 28 Pau. Sí, eso es lo que he dicho.

nida). Sin embargo, para explicar el proceso afirma que «*el humo son las bolas que tendrán una temperatura de ebullición más baja y por eso se ha evaporado*» (líneas 21 y 22), es decir, considera que los elementos que forman el azúcar se separarán de la misma manera que lo harían los componentes de una mezcla. Vemos cómo reaparece la confusión entre mezcla y compuesto que también se detectó anteriormente tanto a nivel macroscópico (ítem 1) como microscópico (ítem 3).

Por último, este estudiante tiene muchas dudas respecto al tipo de proceso que está sucediendo, pues, aunque comienza diciendo que ha ocurrido «*una oxidación, una reacción química*», indica que una de las sustancias se separa y se evapora (líneas 2 a 4), considerándolo más bien como que ha sufrido un cambio de estado, afirmación que corrobora más adelante en las líneas 11 a 13 («*...al evaporarse lo otro, ha quedado el carbón*»).

Resultados similares a los de esta entrevista se han incluido en la misma categoría donde, como puede verse en la tabla 5, el 40% de los 45 estudiantes entrevistados han asociado, como Pau, el proceso químico a una separación física de los componentes que ya existían en el material. También aparecen otras categorías de respuesta donde este cambio químico se concibe como una transmutación (20%) o como una modificación de sustancias (6,7%), categorías que también se detectaron en el trabajo de Andersson (1990). Solamente el 11% de la muestra da respuestas correctas o casi correctas próximas a la explicación dada por el modelo atomista daltoniano.

En resumen, el porcentaje de estudiantes que no diferencia mezcla de reacción química (46,7%) en esta entrevista es consistente con el de estudiantes que, a nivel macroscópico, no diferencia mezcla y compuesto en el mapa conceptual del ítem 1 (48,6%) y también con el resultado encontrado en el ítem 3 relativo a esta confusión en el nivel microscópico (62,7%). Esta consistencia tal vez nos esté indicando la relevancia que tiene para el aprendizaje de la reacción química la apropiación significativa de los conceptos de *sustancia* y *compuesto químico* en los dos niveles de representación macroscópica y microscópica.

CONCLUSIONES

En los primeros apartados del trabajo se ha mostrado que, históricamente, hubo que superar numerosas dificultades para llegar a introducir las definiciones operacionales de *sustancia*, *compuesto* y *reacción química* (cambio sustancial) en el marco del modelo empirista del siglo XVIII, así como las definiciones ontológicas de estos mismos conceptos en el modelo atómico clásico de la materia del siglo XIX. A título de hipótesis se ha supuesto que estos obstáculos epistemológicos que se presentaron en la historia de la ciencia pueden tener cierto parecido a importantes dificultades presentes actualmente en el aprendizaje de estos conceptos químicos. Los principales problemas y avances cualitativos que se han resaltado en este trabajo al presentar brevemente la evolución de modelos históricos importantes, tales como el de la física aristotélica, el empirista de los siglos XVI al XVIII y el atomista daltoniano, se resumen a continuación:

- El concepto macroscópico de *sustancia* no fue necesario introducirlo en la física aristotélica. Al considerar el mundo terrestre impuro, se asumía que todos los sistemas materiales eran mezclas más o menos íntimas de unos pocos elementos. La definición operacional de *sustancia* introducida en el modelo empirista se empezó a considerar por razones científicas, tecnológicas, sociales y económicas a partir del siglo XVI ante la necesidad práctica de reconocerlas y obtenerlas con cierta pureza en la fabricación de medicamentos y en la metalurgia (Klein, 1996).
- El problema de la diferenciación entre mezcla homogénea y compuesto (denominado el problema de los *mixtos*) no fue resuelto en el modelo aristotélico-escolástico (Partington, 1948; Leicester, 1967). Solamente empieza a resolverse con ayuda de la introducción de la definición operacional de *sustancia* en el modelo empirista.
- La difícil diferenciación entre proceso físico y químico sigue persistiendo incluso después de la aceptación del modelo atómico de Dalton y, en particular, cuando hay que interpretar algunos procesos como las disoluciones, las aleaciones, la obtención de vidrios, etc., que no requerían una composición definida de los reactivos para su fa-

Tabla 5

Porcentajes obtenidos en las diferentes interpretaciones que hacen los estudiantes (N = 45) de la descomposición térmica del azúcar.

CATEGORÍA DE RESPUESTA	PORCENTAJE (%)
• Respuestas próximas a la interpretación daltoniana (*).	11,0
• Piensan que el azúcar es la mezcla de dos componentes que se separan (uno se evapora y otro queda en el tubo).	40,0
• Consideran que se ha producido un cambio drástico a modo de transmutación de sustancias.	20,0
• Consideran que el producto es lo mismo que había al principio pero que ha cambiado de forma.	6,7
• Dan una descripción superficial del proceso.	6,7
• Incodificables.	15,6

(*) Respuestas consideradas como correctas

bricación. En estos procesos se obtenían los denominados en el siglo XIX compuestos «imperfectos» por oposición a los compuestos «perfectos» que cumplían la ley de las proporciones constantes de Proust. Actualmente se les suele denominar «compuestos berthólidos».

- La introducción por el modelo atomista del concepto microscópico de *sustancia*, como material que tiene todas las partículas iguales, permitió explicar las definiciones operacionales de sustancia elemental, compuesto y reacción química, así como las leyes de la conservación de la masa y de las proporciones constantes en estos procesos.

Por su parte, las dificultades de los estudiantes de educación secundaria y bachillerato detectadas en este trabajo sobre los conceptos macroscópicos y microscópicos de *sustancia*, *compuesto* y *reacción química* se resumen a continuación:

- La mayoría de los estudiantes no se ha apropiado de la definición operacional de sustancia química en el nivel macroscópico (material que tiene un conjunto de propiedades características e invariables) y asocian el significado de este término con el más genérico de material o producto (71,4%) que habitualmente utilizamos para nombrar las mezclas. Por otra parte y a nivel microscópico, la mayoría del alumnado no sabe definir sustancia como un material que tiene todas sus partículas (átomos o moléculas) iguales. Para esta mayoría (69,3%), la sustancia solamente ha de tener un tipo de átomos, es decir asocian sustancia a sustancia simple.

- La segunda conclusión relevante de este estudio es que para, aproximadamente, las dos terceras partes de la muestra de estudiantes (62,7%), tanto a escala macroscópica como microscópica, es lo mismo mezcla y compuesto, basándose en que ambas clases de sistemas materiales están formadas por más de una sustancia simple (que suelen identificar con el concepto de *elemento*).

- Otra de las dificultades mostradas en, aproximadamente, la mitad de los estudiantes encuestados (48,2%) consiste en no saber distinguir un proceso físico de un cambio químico. Suponemos que una de las causas fundamentales es la falta de asimilación de la definición

operacional de sustancia. Sin este prerrequisito conceptual será difícil discriminar entre mezcla y compuesto y, por tanto, tampoco serán capaces de apreciar si se mantiene la mezcla inicial de sustancias o se ha producido una reacción y han aparecido sustancias diferentes.

- Finalmente y en coherencia con lo indicado en el párrafo anterior, aproximadamente uno de cada diez estudiantes entrevistados (11%) da una interpretación correcta o casi correcta de la descomposición térmica del azúcar en tubo de ensayo.

A partir de estos resultados se pueden registrar algunas semejanzas entre problemas encontrados en modelos históricos anteriores al daltoniano sobre los cambios materiales y las dificultades de los estudiantes. Estas semejanzas se presentan en la tabla 6.

De todo lo expuesto anteriormente, consideramos que se puede producir una relación fructífera entre la psicología del aprendizaje y la epistemología de la ciencia, no sólo para idear estrategias didácticas, sino también para secuenciar contenidos y actividades en el proceso de enseñanza-aprendizaje de las ciencias. Seguir el devenir de los problemas históricos nos va a permitir avanzar hipótesis didácticas sobre posibles dificultades de aprendizaje. Así por ejemplo, al igual que sucedió en su momento, consideramos que la comprensión del concepto de *sustancia química*, tanto a escala macroscópica como microscópica, es fundamental para que los estudiantes alcancen a comprender los cambios químicos. La implicación didáctica que esto conlleva es que los conceptos de *sustancia* y *reacción química* han de introducirse y relacionarse primeramente desde el punto de vista macroscópico para que los estudiantes se apropien de referentes empíricos. Una vez asimiladas las correspondientes definiciones operacionales, la enseñanza ha de ayudar a que los estudiantes puedan emitir hipótesis atómicas que expliquen microscópicamente el comportamiento químico (macroscópico) de las sustancias. De esta manera se favorecerá el establecimiento de relaciones adecuadas entre los dos niveles macro y micro de representación y con ello la comprensión de los cambios químicos, de forma parecida a como sucedió históricamente.

Tabla 6
Semejanzas entre algunos problemas históricos y dificultades de los estudiantes en la representación de las sustancias y de las reacciones químicas como cambios sustanciales.

PROBLEMAS EN MODELOS HISTÓRICOS DE REFERENCIA	DIFICULTADES DE LOS ESTUDIANTES
El problema de los mixtos, capaces de descomponerse en sustancias más sencillas, con propiedades diferentes (sistemas materiales homogéneos, como los compuestos) no fue resuelto en el modelo aristotélico.	No tienen criterios macroscópicos para saber si un sistema material es una mezcla de sustancias simples o una única sustancia compuesta por estos elementos. Estas deficiencias se deben a no haberse apropiado de la definición operacional de sustancia química.
En el modelo aristotélico no hay diferencias categóricas entre proceso físico y químico, ya que se trata de un continuo que va desde el proceso más lábil al más violento, explicado en base a la transmutación de elementos. Por ejemplo, la rarefacción consistía en la transmutación del agua líquida (fría y húmeda) en aire (caliente y húmedo), por medio del fuego.	Como no tienen clara la conservación, o no, de las sustancias, no pueden diferenciar entre proceso físico y químico, identificando ambos.
Hasta bien entrado el siglo XVIII, la definición operacional de sustancia simple dependía de los procedimientos utilizados en la descomposición de los compuestos. La comprensión de los cambios químicos se basaba en referentes empíricos a falta de una teoría atómica que los explicara	No entienden el concepto microscópico de sustancia, como material que tiene todas las partículas iguales (átomos o moléculas), con las que han de explicar sus propiedades (en particular, la composición definida de los compuestos y las relaciones estequiométricas constantes en los cambios químicos).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSSON, B. (1990). Pupils' Conceptions of Matter and its Transformations (age 12-16). *Studies in Science Education*, 18, pp. 53-85.
- BENARROCH, A. (2000). El desarrollo cognoscitivo de los estudiantes en el área de la naturaleza corpuscular de la materia. *Enseñanza de las Ciencias*, 18(2), pp. 235-246.
- BENSAUDE-VINCENT, B. y STENGERS, I. (1997). *Historia de la Química*. Madrid: Addison-Wesley y Universidad Autónoma de Madrid.
- BEN-ZVI, R., EYLON, B. y SILBERSTEIN, J. (1986). Is an atom of copper malleable? *Journal of Chemical Education*, 63(1), pp. 64-66.
- BOAS, M. (1969). Structure of matter and chemical theory in the xvii and xviii centuries, en Clagett, M. (ed.). *Critical problems in the History of Science*, pp. 499-515. Madison: University of Wisconsin.
- BROCK, W.H. (1998). *Historia de la Química*. Madrid: Alianza Editorial S.A.
- BULLEJOS, J. (2001). «La enseñanza y el aprendizaje del cambio químico en la educación secundaria. Análisis crítico y propuesta de mejora». Tesis doctoral. Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales. Universidad de Granada.
- CAÑAL, P. (1997). La fotosíntesis y la «respiración inversa» de las plantas: ¿un problema de secuenciación de los contenidos? *Alambique*, 14, pp. 21-36.
- CHALMERS, A. (1998). Retracing the ancient steps to atomic theory. *Science & Education*, 7(1), pp. 69-84.
- De VOS, W. y VERDONK, A.H. (1985). A new road to reactions. Part 2. *Journal of Chemical Education*, 62(3), pp. 648-649.
- DRIVER, R. y OLDHAM, V. (1985). A constructivist approach to curriculum development in Science. *Studies in Science Education*, 13, pp. 105-122.
- DRIVER, R., SQUIRES, A., RUSWORTH, P. y WOOD ROBINSON, V. (1994). Constructing scientific knowledge in the classroom. *Educational Researcher*, 23(7), pp. 5-12.
- EILAM, B. (2004). Drops of Water and of Soap Solution: Students' Constraining Mental Models of the Nature of Matter. *Journal of Research in Science Teaching*, 41(10), pp. 970-993.
- ESTANNY, A. e IZQUIERDO, M. (1990). *La evolución del concepto de afinidad analizada desde el modelo de S. Toulmin*. Lluç, 13, pp. 349-378.
- FERNÁNDEZ, M. (1999). Elementos frente a átomos. Raíces históricas e implicaciones didácticas. *Alambique*, 21, pp. 59-66.
- FURIÓ, C., HERNÁNDEZ, J. y HARRIS, H. (1987). Parallels between adolescents' conception of gases and the History of Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 64(7), pp. 616-618.
- FURIÓ, C. y DOMÍNGUEZ, C. (2001). Conocer la historia de la ciencia para comprender las dificultades de los estudiantes sobre el concepto de sustancia química. *Enseñanza de las Ciencias*, núm. extra. VI Congreso Internacional sobre Investigación en la Didáctica de las Ciencias, pp. 55-56.
- GIL, D. (1981). *La idea de materia*. València: ICE Universitat de València.
- HARRISON, A.G. y TREAGUST, D.P. (2002). The Particulate Nature of Matter: Challenges in Understanding the Submicroscopic World, en Gilbert, J.K., De Jong, O., Justi, R., Treagust, D.F. y Van Driel, J.H. (eds.). *Chemical Education: Towards Research based Practice*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- HERNÁNDEZ, J. (1997). «Dificultades de aprendizaje sobre la naturaleza corpuscular de la materia en la enseñanza secundaria. Una propuesta para superarlas». Tesis doctoral. Universitat de València. Departament de Didàctica de les Ciències Experimentals i Socials.
- HOLTON, G. y ROLLER, D. (1963). *Introducción a la Física Moderna*. Barcelona: Ed. Reverté S.A.
- JOHNSON, P.M. (1996). What is a substance? *Education in Chemistry*, march, pp. 41-42 y 45.
- KABAPINAR, F., LEACH, J. y SCOTT, P. (2004). The design and evaluation of a teaching-learning sequence addressing the solubility concept with Turkish secondary schools students. *International Journal of Science Education*, 26(5), pp. 635-652.
- KLEIN, U. (1996). The chemical workshop tradition and the experimental practice: discontinuities within continuities. *Science in Context*, 9(3), pp. 251-287.
- LEICESTER, H.M. (1967). *Panorama histórico de la química*. Madrid: Alhambra.
- MEHEUT, M. (2004). Designing and validating two teaching-learning sequences about particle models. *International Journal of Science Education*, 26(5), pp. 605-618.
- MILLAR, R. (1996). Investigations des élèves en science: une approche fondée sur la connaissance. *Didaskalia*, 9, pp. 9-30.
- MORTIMER, E.F. (1995). Conceptual change or conceptual profile change? *Science & Education*, 4(3), pp. 267-285.
- MORTIMER, E.F. (2001). Perfil Conceptual: formas de pensar y hablar en las clases de ciencias. *Infancia y Aprendizaje*, 24(4), pp. 475-490.
- PARTINGTON, J.R. (1948). The concepts of substance and chemical element. *Chymia*, 1, pp. 109-121.
- POZO, J.I. y GÓMEZ CRESPO, M.A. (2005). The embodied nature of implicit theories: the consistency of ideas about the nature of matter. *Cognition and Instruction*, 23(3), pp. 351-387.
- ROCKE, A.J. (1986). *Chemical atomism in the nineteenth century*. Columbus: Ohio State University Press.
- RAHAYU, S. y TYTLER, R. (1999). Progression in primary school children's conceptions on burning: toward an un-

- derstanding of the concept of substance. *Research in Science Education*, 29(3), pp. 295-312.
- SALTIEL, E. y VIENNOT, L. (1985). ¿Qué aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontáneo de los estudiantes? *Enseñanza de las Ciencias*, 3(2), pp. 137-144.
- SANMARTÍ, N. (1989). «Dificultats en la comprensió de la diferenciació entre els conceptes de mescla i compost». Tesis doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona.
- SANMARTÍ, N., IZQUIERDO, M. y WATSON, R. (1995). The substantialisation of properties in pupils' thinking and in the history of science. *Science & Education*, 4, pp. 349-369.
- SOLOMONIDOU, C. y STAVRIDOU, H. (1994). Les transformations des substances, enjeu de l'enseignement de la réaction chimique. *Aster*, 18, pp. 75-95.
- SOLSONA, N. e IZQUIERDO, M. (1998). La conservación del elemento, una idea inexistente en el alumnado de secundaria. *Alambique*, 17, pp.76-84.
- STAVRIDOU, H. y SOLOMONIDOU, C. (1989). Physical phenomena-chemical phenomena: do pupils make the distinction? *International Journal of Science Education*, 11(1), pp. 83-92.
- STAVY, R. (1991a). Children's ideas about matter. *School Science and Mathematics*, 91(6), pp. 240-244.
- STAVY, R. (1991b). Using analogy to overcome misconceptions about conservation of matter. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(4), pp. 305-313.
- WANDERSEE, J.H., MINTZES, G. y NOVAK, J.D. (1994). Research on alternative conceptions in science, en Gabel D.L. (ed.). *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*, pp. 177-210. Nueva York: McMillan Publishing Company.

[Artículo recibido en agosto de 2005 y aceptado en febrero de 2006]

ANEXO 1

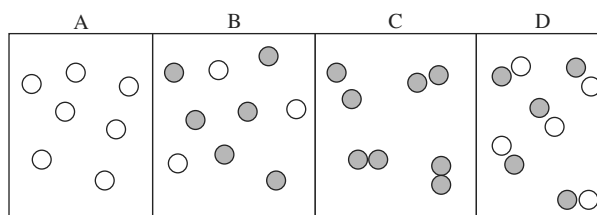
1. Haz un mapa conceptual utilizando las siguientes palabras: heterogénea, azufre, compuesto (o sustancia compuesta), mezcla, sal fuman, aire, agua, sustancia simple, homogénea, materia, sustancia, cobre, leche, disolución, bicarbonato sódico.

Utiliza todas las conexiones necesarias **explicando en qué te basas** para establecer estas relaciones o conexiones.

2. Actualmente todos hemos oído hablar de: luz, aire, agua, fuego, granito, onda de radio. Subraya los que crees que están formados por **una sustancia**.

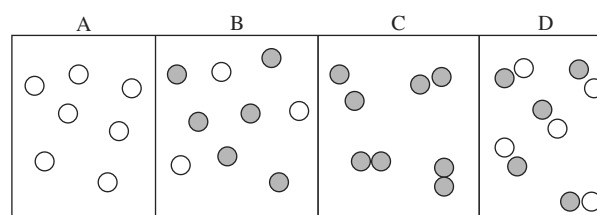
Explica en qué te basas y por qué crees que los otros no lo son _____

3. Los dibujos siguientes representan gases. Cada bolita simboliza un átomo y las del mismo color son átomos idénticos. Indica cuál o cuáles de ellos pueden ser una mezcla:



Justifica tu respuesta: _____

4. Los dibujos siguientes representan gases. Cada bolita simboliza un átomo y las del mismo color son átomos idénticos. Indica cuál o cuáles de ellos pueden ser una sustancia.



Justifica tu respuesta: _____

ANEXO 2

Modelo de entrevista

Se presenta al alumno una piedra, bicarbonato sódico, azúcar, sal, zinc en polvo, óxido de plomo, carbón, agua, vino, ácido clorhídrico, aire, alcohol etílico y la luz de una llama.

Prof1: De todas estas cosas, ¿cuál o cuáles piensas que pueden ser una sustancia?

P2: ¿Por qué crees que esas son sustancias?

P3: Si te dieran un producto y hubieras de determinar en el laboratorio si se trata o no de una sustancia, ¿cómo lo harías?

P4: Imagina que se pudiera ver una sustancia a nivel submicroscópico, ¿puedes dibujar lo que verías?

Experiencia. Descomposición del azúcar: Se introduce un poco de azúcar en un tubo de ensayo y se calienta. Se pide al alumno que explique lo que le ha ocurrido al azúcar después de carbonizarse.

P5: ¿Puedes explicar lo que está pasando?

P6: ¿Qué es lo que sale?

P7: ¿De dónde piensas que ha salido el gas?

P8: ¿Por qué antes no se salía?

P9: ¿Qué crees que es lo que ha quedado en el fondo del tubo?

P10: ¿Podrías hacer un dibujo que represente las partículas del azúcar antes de quemarlo?

P11: Teníamos azúcar, que ha desaparecido y, en cambio, ha salido mucho humo y ha quedado carbón en el fondo del tubo de ensayo. ¿Cómo lo explicas?

P12: ¿Qué tipo de sustancia piensas que puede ser el azúcar, simple o compuesta? ¿Por qué?